

***Е. В. Ханькова<sup>\*</sup>, С. И. Степанов, Ю. Н. Логинов, А. В. Корелин***

Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина,  
г. Екатеринбург

<sup>\*</sup>*xbxekaterina@yandex.ru*

## **ОСТАТОЧНАЯ ПОРИСТОСТЬ В ТИТАНОВЫХ ИМПЛАНТАТАХ, ПОЛУЧЕННЫХ АДДИТИВНЫМИ ТЕХНОЛОГИЯМИ**

На основе литературного обзора и собственных данных проанализированы виды пористости в титановых имплантатах, полученных аддитивными технологиями. В образцах, полученных SLS-процессом, выявлены поры, появившиеся за счет неполного слияния частиц. Материалы SLM технологий могут иметь такую же пористость, но в меньших проявлениях. В них чаще наблюдаются несплошности виде округлых пор. Третий вид пористости может быть обусловлен архитектурой 3D печати за счет программного обеспечения.

*Ключевые слова:* аддитивные технологии, 3D печать, пористость, структура, титановые сплавы.

***E. V. Khanykova, S. I. Stepanov, Yu. N. Loginov, A. V. Korelin***

## **RESIDUAL POROSITY IN TITANIUM IMPLANTS MANUFACTURED BY MEANS OF ADDITIVE TECHNOLOGIES**

Based on the literature review and own data, the porosity in titanium implants obtained by additive technologies is analyzed. In the samples obtained by the SLS process, pores appeared due to incomplete fusion of the particles. The materials of SLM technologies can have the same porosity, but in smaller manifestations. In them, discontinuities are more often seen as rounded pores. The third kind of porosity can be caused by the 3D printing architecture due to the software.

*Keywords:* additive technologies, 3D printing, porosity, structure, titanium alloys.

Выполненный литературный поиск в области применения аддитивных технологий при получении имплантатов хирургического назначения (например, [1, 2]) показал, что послойное формование в инертной среде с использованием лазера является наиболее часто используемым методом. Наиболее развиты варианты аддитивных технологий SLS и SLM. С позиций наименьшего проявления остаточной микропористости кажется более предпочтительным вариант SLM, поскольку он предполагает полное сплавление частиц порошка, а вариант

SLS – только частичное. Следует отметить, что в данном случае речь идет именно об остаточной пористости, а не о макропористости, формируемой осознанно для создания той или иной архитектуры материала.

Частичное сплавление предполагает наличие мостиков схватывания между отдельными частицами. Тем самым создаются предпосылки для создания пор между частицами. В результате не достигается беспористое состояние, что должно приводить к изменению физико-механических свойств материала. Наличие пористости объявлено негативным явлением, поэтому для ее снижения предложено применять процесс горячего изостатического прессования (HIP) [3].

Ниже выполнено сравнение результатов получения образцов методом SLS по данным работы Benedetti и методом SLM, примененным в настоящем исследовании (рис. 1).

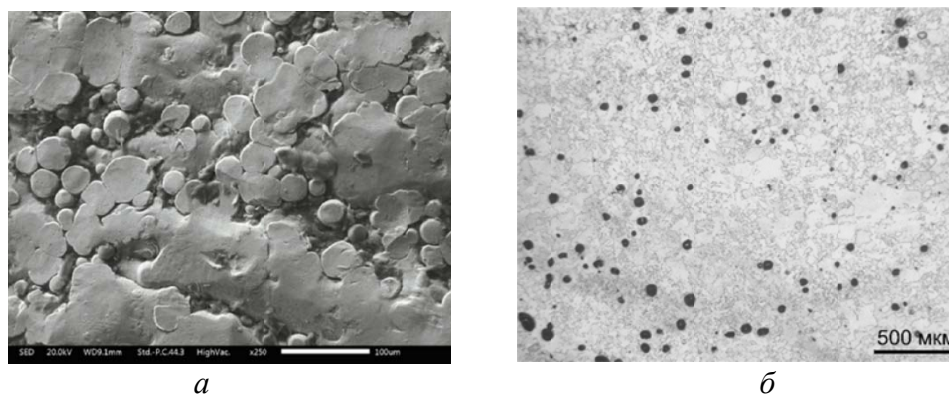


Рис. 1. Остаточная пористость в материале на основе сплава Ti6Al4V, полученном SLS-способом, по данным работы Benedetti (*а*), и SLM-способом в настоящей работе для титана (*б*)

Видно, что для метода SLS характерно наличие большого количества отдельных частиц, имеющих фрагментарные поверхности схватывания. В материале, полученном SLM-методом такие частицы тоже есть, но их количество достаточно мало. На фотографиях видно, что тот и другой материал обладает остаточной пористостью.

Наличие пористости приводит к необходимости формулировки уравнений связи с ней характеристик материала [4]. В порошковой металлургии, например, характеристики предела прочности на сжатие в свое время было предложено описывать уравнениями, где аргументом являлась относительная плотность материала. Впоследствии такие связи были усложнены введением инвариантных показателей напряженного состояния [5, 6]. Следует отметить, что само испытание на прочность при сжатии ячеистых структур предполагает определение довольно большого набора характеристик [7].

Сравнение макропористости и микропористости можно пояснить на примере создания архитектуры материала с ячейками из титанового сплава Ti-6Al-4V (рис. 2), приведенной в работе [8]. Здесь видно, что макропора, создающая элемент архитектуры, выполнена квадратного сечения. Но стенки ячейки могут обладать различной пористостью на микроуровне в зависимости от параметров 3D-печати в двух вариантах: при плотности энергии 45 (рис. 2, а) и 173 Дж/мм<sup>3</sup> (рис. 2, б) при параметрах процесса: мощность лазера 170 и 117 Вт, скорость сканирования 1250 и 225 мм/с, шаг сканирования 100 и 180 мкм, толщина слоя 30 мкм, диаметр пятна лазера 100 мкм.

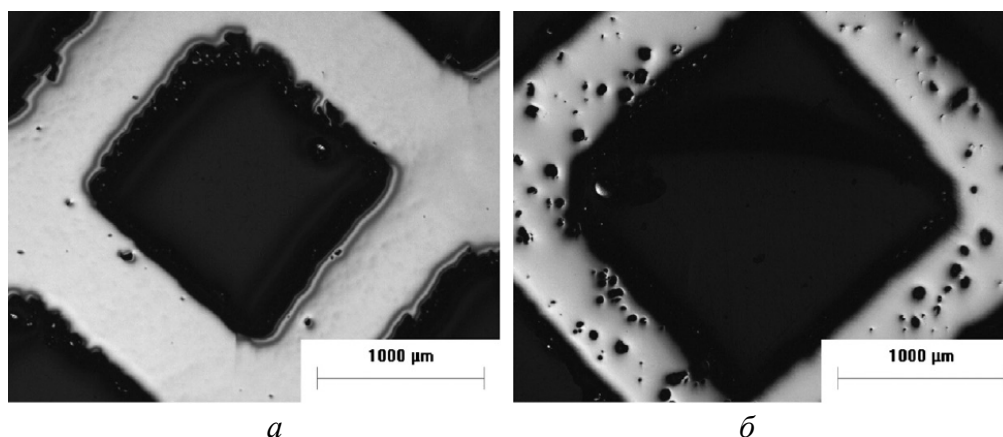


Рис. 2. Макро- и микропористость в материале на основе сплава Ti-6Al-4V, полученного в SLM-процессе, по данным работы Sallica-Leva, при плотности энергии 45 (а) и 173 Дж/мм<sup>3</sup> (б)

Как видно из рисунка, меньшая пористость была достигнута при большей плотности энергии. Можно также отметить, что характер микропористости здесь иной, чем в работе Benedetti. В методе CLS микропористость обусловлена наличием пустот между частицами, а на рис. 2, б видно, что поры имеют округлую форму, не характерную для такого вида пустот. Это говорит о том, что эти поры возникли другим путем. Основная гипотеза их возникновения состоит в большей чувствительности титана к водороду при повышенных температурах обработки. Авторы не могли утверждать, что водород полностью отсутствует в аргоне, примененным в этом случае в качестве защитной среды. Можно отметить, что такая чувствительность процесса к даже малому содержанию водорода, характерна для титановых сплавов.

На рис. 1, б также можно выявить поры с формой, приближенной к круглой, но при этом в этих пустотах могут располагаться частицы порошка, припавшие к поверхности с образованием пор по типу, характерному для SLS-процесса.

Выводы. Сравнение видов пористости, наблюдаемых в ячеистых материалах, полученных аддитивными технологиями, показывает наличие, по крайней мере, трех вариантов: макропористость, искусственно созданная технологией 3D печати, микропористость, обусловленная неполным слиянием частиц порошка и микропористость, обусловленная физико-химическими процессами в самом материале.

*Работа выполнена при финансовой поддержке постановления Правительства Российской Федерации от 9 апреля 2010 года № 218, номер соглашения 03.G25.31.0234 от 03.03.2017 г.*

## ЛИТЕРАТУРА

1. Computational prediction of the fatigue behavior of additively manufactured porous metallic biomaterials / R. Hedayati [et al.] // International Journal of Fatigue. 2016. V. 84. P. 67–79.
2. Additively manufactured metallic porous biomaterials based on minimal surfaces: A unique combination of topological, mechanical, and mass transport properties / F. S. L. Bobbert [et al.] // Acta Biomaterialia. 2017. V. 53. P. 572–584.
3. Fatigue limit of Ti6Al4V alloy produced by Selective Laser Sintering / M. Benedetti [et al.] // Procedia Structural Integrity. 2016, V. 2. P. 3158–3167.
4. Логинов Ю. Н. Развитие методов математического моделирования пластической деформации металлических пористых сред / Ю. Н. Логинов // Научно-технические ведомости СПбПУ. Естественные и инженерные науки. 2005. № 40. С. 64–70.
5. Логинов Ю. Н. Об уравнениях связи напряжений и деформаций для сжимаемого жестко-пластического материала / Ю. Н. Логинов, Н. Н. Шарафутдинов, В. Л. Колмогоров // Технология легких сплавов. 1977. № 4. С. 20–25
6. Колмогоров В. Л. К расчету плотности и прочности изделий, получаемых прессованием некомпактного материала / В. Л. Колмогоров, Ю. Н. Логинов // Обработка металлов давлением : сб. Екатеринбург, 1977. С. 84–87.
7. Испытание на осадку пористого имплантата, полученного аддитивным методом из титанового сплава / Ю. Н. Логинов [и др.] // Титан, 2017. № 2.
8. Sallica-Leva E. Microstructure and mechanical behavior of porous Ti–6Al–4V parts obtained by selective laser melting / E. Sallica-Leva, A. L. Jardini, J. B. Fogagnolo // Journal of the mechanical behavior of biomedical materials. 2013. V. 26. P. 98–108.